Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
"Estudio en la duda. Acción en la fe"
División Académica de Ciencias Básicas

XIX Foro de Matemáticas del Sureste
III Simposio Internacional de Matemáticas

Análisis Estadístico del Potencial Eólico en el Litoral de Paraíso, Tabasco: Un Estudio Basado en la Distribución de Weibull y la Ley de Hellmann

Autor: Heber Rodriguez Carrera
Centro de Estudios Tecnológicos del Mar No. 38 (CETMAR 38), Paraíso, Tabasco, México

CETMar Paraíso 38

1. Introducción

En el contexto actual de crisis climática, la expansión de las energías renovables es fundamental para acelerar la descarbonización global. Para cumplir con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 7 de la Agenda 2030 de la ONU, que exige duplicar la tasa mundial de eficiencia energética e integrar fuentes limpias que se puedan conseguir o adquirir a precios moderados y que estén al alcance de todos los ciudadanos del mundo, se requiere evaluar rigurosamente los recursos locales.

En Tabasco la electricidad se ha convertido en uno de los puntos críticos para su crecimiento. En los primeros meses de 2026, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) registró 226 interrupciones en el suministro eléctrico, un incremento de 84 por ciento respecto de las 123 fallas contabilizadas durante enero–marzo de 2025 [2].

En Paraíso, Tabasco, el problemático escenario de los apagones ocurre generalmente por fallas estructurales en la red de distribución. Ante esto, la energía eólica representa una gran oportunidad para diversificar la matriz energética local, aprovechando los vientos costeros de la región para generar electricidad limpia, descentralizada y mecánicamente más estable.

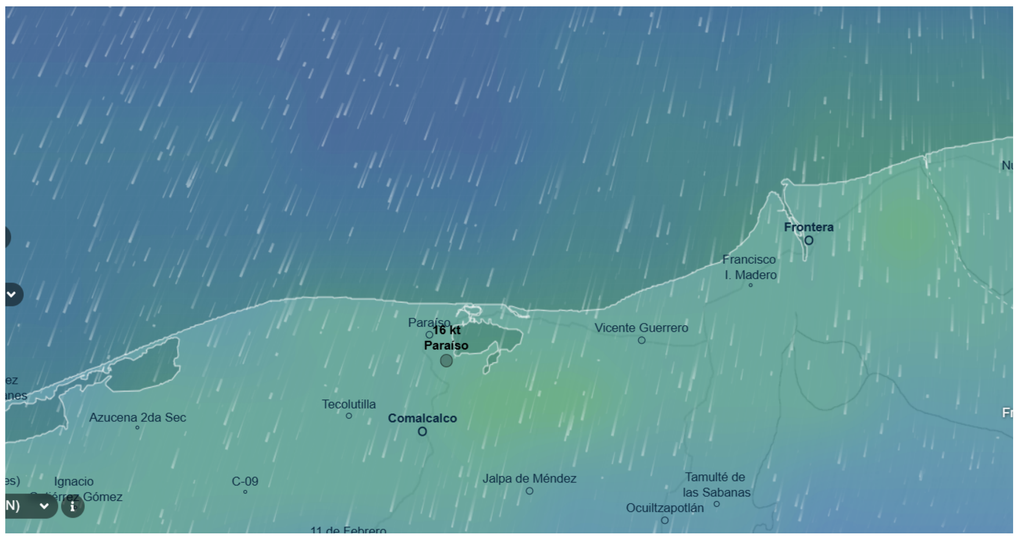


Figura 1. Zona de estudio y vectores de viento: Paraíso, Tabasco (Lat 18.4°, Lon -93.21°).

2. Metodología

Conocer la distribución de la velocidad del viento permite calcular su potencial energético y la energía anual que puede producir un aerogenerador. La Distribución de Probabilidad de Weibull y la Ley de Potencia de Hellmann son herramientas muy valiosas al momento de realizar análisis de datos de la velocidad del viento [4].

El Modelo Weibull.

La distribución de Weibull de dos parámetros es la más utilizada para las evaluaciones de energía eólica, ha demostrado capturar con precisión la asimetría de la distribución de la velocidad del viento, $f(v)$ y se ha utilizado en varios estudios [4],[6]. La distribución Weibull de dos parámetros (k, c), se expresa como:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}\right] \quad (v > 0;\ k, c > 0)$$

En donde:
v: velocidad del viento (m/s).
$f(v)$: función densidad de probabilidad de Weibull.
c: factor de escala (m/s).
k: factor de forma que caracteriza la asimetría o sesgo de la función $f(v)$.

Ley de Hellmann.

La ley de Hellmann es el modelo comúnmente usado para describir las variaciones de la velocidad del viento en elevaciones sobre el suelo [2],[5]. La relación matemática entre la velocidad y la variación de altura se expresa como:

$$\frac{v_{v(z)}}{v_{v0}} = \left[\frac{z}{z_0}\right]^{\alpha}$$

En donde:
$v_{v(z)}$: velocidad del viento a la altura z deseada.
v_{v0}: velocidad del viento de referencia o cota cero.
z: altura deseada.
z_0: altura de referencia o cota cero.
α:es un exponente que representa una forma de medida del rozamiento superficial encontrado por el viento.

Estimación por Máxima Verosimilitud (MLE)

Utilizamos el enfoque de máxima verosimilitud para estimar los parámetros de la función de distribución Weibull. Las funciones de verosimilitud y log-verosimilitud se definen como:

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^{n} f(v_i;\theta) \quad \text{y} \quad \ell(\theta) = \sum_{i=1}^{n} \ln f(v_i;\theta)$$

3. Resultados

Se obtuvieron 131,400 registros horarios históricos (15 años: 2011-2025) de las velocidades del viento a 10 metros de altura en la plataforma NASA POWER y utilizando MLE se calcularon los parámetros de forma (k) y de escala (c) de la distribución Weibull [5]. A continuación se muestran los resultados

Parámetro	Símbolo	Valor
Factor de Forma a 10 m	$\hat{k}$	2.685
Factor de Escala a 10 m	$\hat{c}_{10m}$	5.430 m/s
Exponente de Fricción Real	α	0.133
Factor de Escala a 80 m	$\hat{c}_{80m}$	7.152 m/s

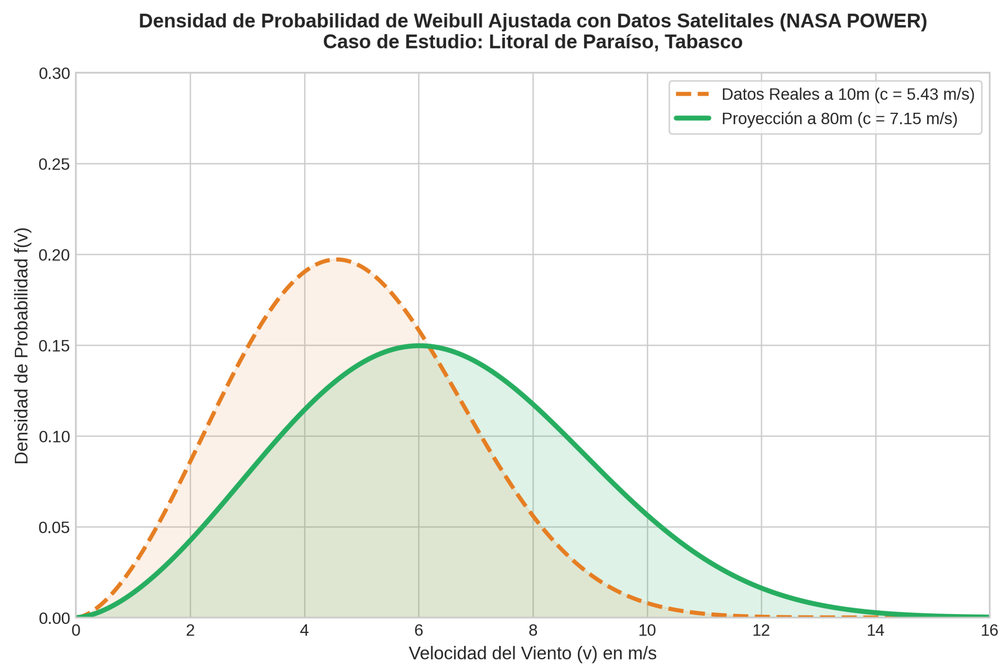


Figura 2. Densidad de probabilidad de Weibull ajustada y proyectada.

El factor $k = 2,685$ indica un régimen eólico altamente simétrico y constante. Para un aerogenerador de 1,850 kW de capacidad nominal y con un rotor de 100 m de diametro (longitud de sus palas de 50 m) y la altura del buje a 80 m, se tiene que:

- *Potencia Media Esperada ($\bar{P}$):*

$$\bar{P} = \frac{1}{2}\rho A v^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) = 1,857,215 \text{ W} = 1,85 \text{ MW}$$

- *Energía Anual Acumulada (AEP):*

$$AEP = \bar{P} \cdot 8760 \text{ h} = 16,269,203,40 \text{ kWh/año} = 16,27 \text{ GWh/año}$$

4. Conclusiones

Del estudio realizado se tienen las siguientes conclusiones:

- El exponente de fricción calculado ($\alpha = 0,133$) valida de forma analítica las condiciones de baja rugosidad mecánica del litoral plano de Paraíso, Tabasco.
- La extrapolación vertical a una altura de buje de 80 m demuestra que el recurso eólico aumenta de forma masiva la producción energética anual en un 128,5 %, evidenciando el impacto físico directo del efecto cúbico de la velocidad sobre el flujo del viento.
- El modelado estadístico demuestra que la costa local cuenta con un recurso de alta predictibilidad y constancia. Al acoplarse con un área de barrido comercial de 7,854 m^2, se valida la viabilidad técnica para generar hasta 16.27 GWh/año por turbina, presentándose como una alternativa real de gran escala para mitigar las interrupciones del suministro de la red eléctrica regional.

Los resultados obtenidos son un Estudio de Prospección Eólica. Se muestra que el litoral de Paraíso tiene un potencial real, constante y justificado para ser tomado en cuenta, la consolidación técnica y el financiamiento de un parque eólico comercial requieren mitigar la incertidumbre mediante estudios del perfil vertical del viento y la instalación de estaciones meteorológicas equipadas con anemómetros y veletas calibradas a diferentes alturas para medir el viento minuto a minuto durante al menos 1 o 2 años continuos.

5. Referencias

1. Carta González, J. A., Calero Pérez, R., Colmenar Santos, A., Castro Gil, M. A., & Collado Fernández, E. (2012). Centrales de energías renovables: Generación eléctrica con energías renovables (2ª ed.). Pearson Educación.
2. El Heraldo de Tabasco. (21 de septiembre de 2026). Tabasco suma 226 apagones; fallas eléctricas aumentaron 84 %. Organización Editorial Mexicana. https://oem.com.mx/elheraldodetabasco/local/tabasco-suma-226-apagones-fallas-electricas-aumentaron-84-32185962
3. Extrapolation of Weibull parameters. *J. Renewable Sustainable Energy*, 17(2).
4. Manwell, J. F., et al. (2010). *Wind Energy Explained*. Wiley.
5. NASA/POWER Project. *Hourly MERRA-2 Dataset (2011–2025)*.
6. Shu, Z. R., & Jesson, M. (2021). Estimation of Weibull parameters for wind energy analysis across the UK. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 13(2), Artículo 023303. https://doi.org/10.1063/5.0038001